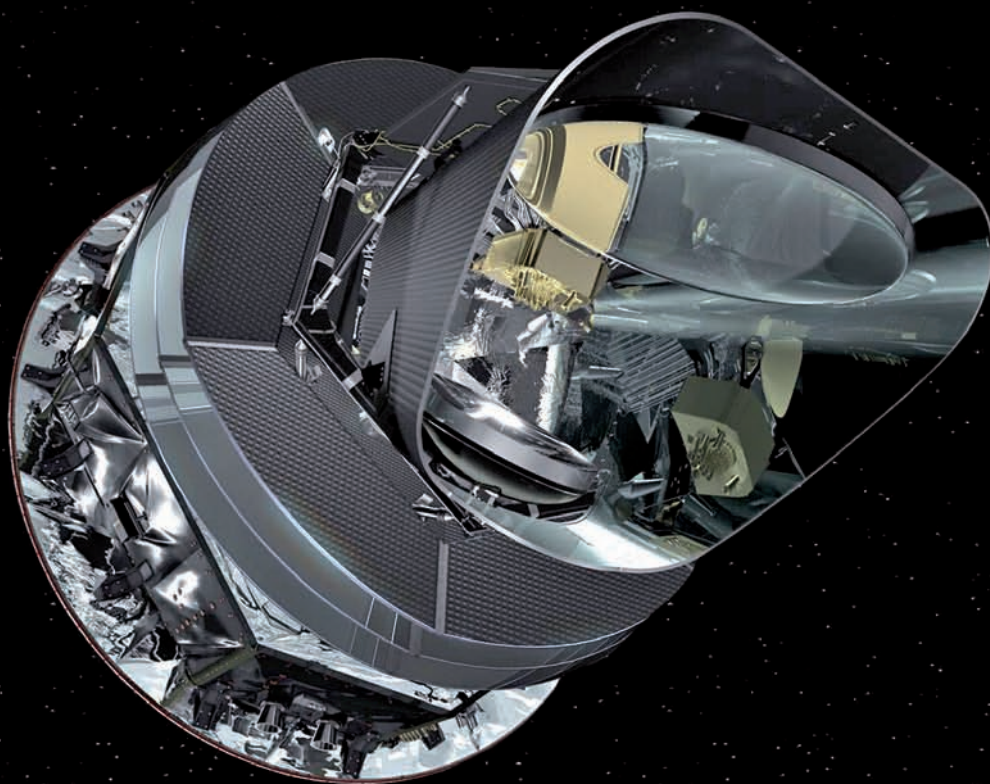




Artículo exclusivo
colaboración de la
Sociedad Española
de Astronomía



PRIMEROS RESULTADOS COSMOLOGICOS DE *PLANCK*

La misión *Planck* de la Agencia Espacial Europea termina su vida con un gran éxito científico y tecnológico. En este artículo revisamos los principales resultados de la misión, haciendo hincapié en la contribución española al experimento y el análisis de los datos obtenidos.

GRUPO DE COSMOLOGÍA OBSERVACIONAL E INSTRUMENTACIÓN DEL
INSTITUTO DE FÍSICA DE CANTABRIA, EN NOMBRE DE LA COLABORACIÓN *PLANCK*

Hace apenas un siglo, el origen del Universo era un tema escabroso que pocos científicos se atrevían a abordar. La situación ha cambiado

mucho en las últimas décadas: hoy en día la Cosmología, la ciencia que pretende explicar cómo se formó y evoluciona el Universo, se ha convertido en una de las ciencias experimentales más fecundas, gracias a la cual sabemos detalles tales como que el Universo fue en el pasado mucho más caliente y denso de lo que es hoy en día, que comenzó a expandirse y enfriarse hace unos catorce mil millones de años, y que todavía hoy continúa haciéndolo a un ritmo cada vez más rápido. Pero pese a los grandes avances de la Cosmología en las últimas décadas, muchas de las preguntas más fundamentales continúan sin respuesta: qué fue lo que motivó el nacimiento del Universo, por qué se expande de la forma que lo hace y cuál será su evolución en el futuro. A diferencia de hace un siglo, al menos hoy sabemos hacia dónde mirar en busca de respuestas a algunas de estas preguntas.

Una de las fuentes de información más valiosa a la que podemos recurrir para responder a estas preguntas es la Radiación del Fondo Cósmico de Microondas, abreviando FCM (o también CMB por sus siglas en inglés). El FCM es la luz térmica que permeaba el Universo cuando este era mucho más joven, denso y caliente que ahora. Aun hoy en día podemos observar el FCM gracias a que, debido a que la luz no se transmite instantáneamente, mirar hacia regiones muy remotas del Universo equivale a observar el pasado. El FCM nos proporciona una valiosa imagen del Universo en su más temprana infancia. Por desgracia, la luz del FCM es extremadamente tenue y hace falta la más moderna tecnología de detección para poder obtener esta «foto» del Universo primitivo.

La misión europea *Planck*, bautizada así en honor al físico alemán Max Planck (1848-1957), ha sido el más exitoso de los observatorios del FCM hasta la fecha. Desde mayo de

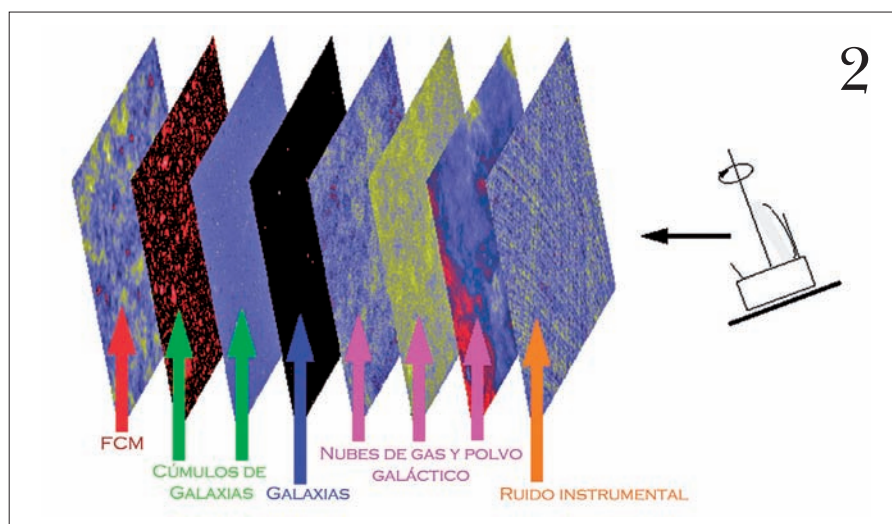


FIGURA 1 [Pagina anterior] Visión artística del satélite *Planck*. (NASA/JPL-Caltech/ESA) **FIGURA 2** Capas superpuestas en una imagen típica del FCM. (ESA)

2009 hasta mediados del año pasado *Planck* ha estado observando el cielo con gran sensibilidad y resolución angular en nueve canales de frecuencia comprendidos entre los 30 y los 857 GHz, es decir, frecuencias de microondas, parecidas a las que se usan en telefonía móvil. Es precisamente en ese intervalo de frecuencias donde la luz del FCM es más intensa. Por desgracia, la atmósfera de la Tierra y las propias señales emitidas por el hombre interfieren fuertemente en las observaciones en estas frecuencias y, por tanto, muchos observatorios de microondas, incluyendo a *Planck*, han de colocarse en el espacio.

Planck (Figura 1) consta de un telescopio de 1,5 metros de diámetro, en cuyo plano focal se sitúan dos instrumentos: el instrumento de baja frecuencia (LFI por sus siglas en inglés), que obtiene imágenes en tres canales entre 30 y 70 GHz, y el instrumento de alta frecuencia (HFI por sus siglas en inglés), que observa en otros seis canales entre 100 y 857 GHz. La diferencia entre ambos instrumentos, aparte de las frecuencias de observación, radica en el tipo de tecnología de los detectores y los sistemas de criogenia. Los receptores del HFI, mientras estuvieron en funcionamiento, estuvieron enfriados hasta la increíble temperatura de 0,1 K (-273,05° C), ¡lo que los convertía en el punto más frío del universo conocido fuera de la Tierra!

Tras más de dos años enviando datos a la Tierra, *Planck* se apagó definitivamente el año pasado. También en 2013 se publicaron los primeros resultados cosmológicos fruto de los datos analizados hasta la fecha. Parte de los datos de *Planck* aún no han terminado de ser estudiados, por lo que a lo largo de los próximos meses se enviarán nuevas publicaciones a revistas internacionales especializadas en astrofísica y cosmología. En este artículo revisaremos los principales resultados publicados en 2013, no solo en el campo de la Cosmología sino también en otras áreas relacionadas de la Astronomía y la Astrofísica.

EL LARGO CAMINO DE LA LUZ DEL FCM

La radiación del FCM que buscan *Planck* y otros telescopios similares se originó hace la friolera de trece mil setecientos millones de años. En su largo camino hacia nosotros, los fotones del FCM han vivido todas las fases de la evolución del Universo y se han topado con multitud de objetos y fenómenos astrofísicos, incluyendo cúmulos de galaxias, galaxias individuales, nubes de polvo y gas en nuestra propia Galaxia y, finalmente, la materia de nuestro Sistema Solar y la propia electrónica de nuestros detectores (Figura 2). A estos obstáculos hay que añadir la atmósfera de la Tierra, para el caso de telescopios colocados sobre nuestro

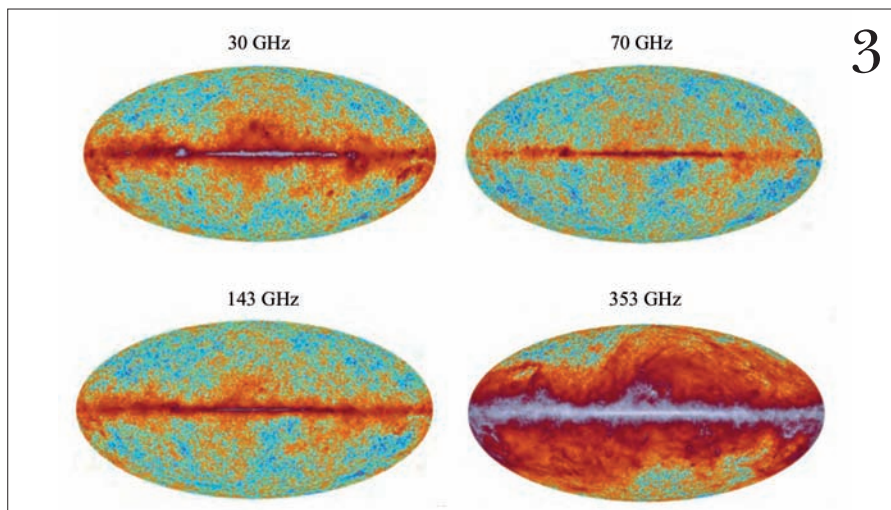


FIGURA 3 Algunas de las imágenes obtenidas por *Planck* a distintas frecuencias. [ESA & Planck Collaboration]

planeta. Esto se convierte en un inconveniente, por un lado, y en una ventaja, por el otro: la señal del FCM aparece «contaminada» por multitud de interferencias espurias, lo que dificulta enormemente su estudio, pero por otro lado las huellas que dejan estas interferencias en las imágenes del FCM nos permiten estudiar en detalle la estructura de nuestra Galaxia y el Universo cercano en un rango de frecuencias que apenas había sido observado anteriormente. Para extraer esta valiosa información codificada en las imágenes que obtiene *Planck*, es necesario procesar los datos para separar dichas radiaciones y obtener una imagen limpia de la señal cosmológica. Esto se consigue explotando la diferente dependencia en frecuencias de las componentes observadas: mientras que la radiación del FCM sigue la de un cuerpo negro a todas las frecuencias (lo que se conoce como la *ley de Planck*), las emisiones contaminantes no. Por tanto, es fundamental que los experimentos del FCM realicen observaciones a varias frecuencias. En particular, *Planck* tiene una excelente cobertura en frecuencias, observando en nueve bandas diferentes, que van desde 30 GHz hasta 857 GHz. En la Figura 3 se muestran algunos de los datos obtenidos por *Planck*, donde se puede apreciar que la emisión galáctica (concentrada principalmente en una banda en el centro de cada mapa) cambia apreciablemente con

la frecuencia, siendo más importante a frecuencias bajas y altas, mientras que a las frecuencias centrales del experimento, el FCM aparece menos contaminado.

Dentro de la colaboración *Planck* se han desarrollado y comprobado diversas técnicas avanzadas de separación de componentes con el fin de realizar un limpiado óptimo de los datos. En particular, *Planck* ha producido cuatro mapas limpios del FCM, utilizando cuatro técnicas significativamente diferentes. El hecho de generar varios mapas limpios, y no solo uno, permite validar el resultado del complejo proceso de separación de componentes así como llevar a cabo pruebas de consistencia de los datos: si el análisis de mapas contruidos de forma diferente llevan al mismo resultado, como se ha visto en el caso de *Planck*, esto indica un mayor grado de fiabilidad de las conclusiones obtenidas. Cabe destacar que investigadores españoles han sido responsables de uno de los métodos de separación de componentes seleccionados por la colaboración para producir un mapa limpio del FCM, el cual se ha puesto a disposición de la comunidad científica.

Gracias a estas técnicas de separación de componentes, y aunque *Planck* ha sido concebido como un experimento enfocado principalmente al estudio del FCM, sus datos han proporcionado también multitud de descubrimientos para los astrofísicos interesados en física galác-

tica y extragaláctica. De hecho, los primeros artículos hechos públicos por la colaboración *Planck* en 2011 y 2012 se centraron en el estudio de las señales «no FCM» de las imágenes de *Planck*. Describamos un poco más en detalle los principales resultados obtenidos para cada una de las componentes.

CÚMULOS DE GALAXIAS CON *PLANCK*

Los cúmulos de galaxias contienen decenas o hasta cientos de galaxias formando enjambres relativamente compactos. Los cúmulos de galaxias se forman en las zonas del Universo que tienen mayor densidad y a través del estudio de su abundancia se puede medir la cantidad de materia que contiene el Universo, así como la geometría del mismo. Los cúmulos de galaxias contienen además enormes cantidades de materia oscura (en torno al 85 % de la masa de un cúmulo es materia oscura), y gas ionizado o plasma (en torno a un 10 % de la masa del cúmulo es plasma). *Planck* ha podido ver directamente este gas ionizado a través de un fenómeno conocido como efecto Sunyaev-Zeldovich. Gracias a este efecto, *Planck* ha detectado unos mil cúmulos de galaxias, cuatrocientos de ellos previamente desconocidos, y ha medido la cantidad de gas ionizado en muchos de ellos, permitiendo a su vez realizar estudios sobre la cantidad de materia oscura en el Universo. Los datos de *Planck* han permitido también estudiar las regiones de gas ionizado mas frías y menos densas, las cuales son muy difíciles de detectar por otros métodos (Figura 4).

En la actualidad, una de las incógnitas no resueltas de la Cosmología es establecer dónde está localizada la «fracción perdida» de la materia bariónica (es decir, los elementos conocidos que contiene la tabla periódica) en nuestro entorno, ya que nuestros observatorios solo pueden contabilizar a partir de la emisión lumínica de estrellas y galaxias una parte de la que se piensa que existe. Una posibilidad es que la parte de materia bariónica que no se ve pueda encontrarse en forma de gas io-

nizado, pero a una temperatura menor que la existente en cúmulos de galaxias. *Planck* ha detectado gas ionizado poco denso en los alrededores de cúmulos de galaxias, el cual podría dar cuenta de parte de la materia bariónica no detectada en el pasado.

GALAXIAS CON PLANCK

Aparte de las observaciones de cúmulos de galaxias antes mencionadas, *Planck* ha permitido observar miles de galaxias individuales en una ventana del espectro de la luz que era prácticamente inaccesible hasta hace muy pocos años.

El catálogo de fuentes compactas de *Planck* (PCCS de sus siglas en inglés) esta compuesto por más de 25 000 objetos galácticos y extragalácticos, fundamentalmente radio galaxias y galaxias infrarrojas, detectadas en los mapas de la misión *Planck* (Figura 5). Está formado por nueve catálogos, uno por cada una de las frecuencias a las que observa *Planck* entre 30 y 857 GHz. Todos los objetos han sido observados de forma simultánea en cada canal con una gran sensibilidad y una resolución angular de entre 5 y 33 minutos de arco, aunque solo se han detectado en aquellos canales donde su razón de señal-ruido es suficientemente grande. La mayoría de estos objetos están tan alejados de nosotros que *Planck* no tiene suficiente resolución para distinguir su estructura interna y los vemos como objetos puntuales. Pero *Planck* también puede detectar objetos cercanos y resolver su estructura, por lo que en el PCCS se han considerado cuatro estimaciones distintas de la fotometría adaptadas a los tipos de fuentes que se detectan. El PCCS es el catálogo más completo a todo el cielo en la banda de las microondas, mejorando no solo el número de fuentes detectadas sino también las propiedades estadísticas de sus antecesores: el catálogo temprano de fuentes compactas de *Planck* y el catálogo de fuentes compactas del satélite norteamericano WMAP.

Como hemos comentado anteriormente, en las imágenes de *Planck* se



FIGURA 4 Puente de gas caliente entre los cúmulos Abell 399 y Abell 401 detectado por *Planck*. (ESA & Planck Collaboration; STScI Digitized Sky Survey)

combinan principalmente las emisiones difusas y compactas de la Galaxia, el FCM y el ruido de los instrumentos. Esto hace que las fuentes compactas (galácticas o extragalácticas) sean muy difíciles de separar y detectar. Por tanto, es común utilizar técnicas avanzadas de tratamiento de imágenes para mejorar el proceso de detección. Para la construcción de este catálogo se ha utilizado una técnica de filtrado desarrollada en el Instituto de Física de Cantabria y basada en la «wavelet de Sombrero Mexicano» (*Mexican Hat Wavelet* en inglés). Esta función matemática, aplicada como filtro a las imágenes, destaca por tener unas propiedades idóneas para mejorar la detección de objetos compactos en este tipo de datos.

Planck tiene instrumentos sensibles a la polarización de la luz entre 30 y 353 GHz, y en los próximos meses, coincidiendo con una nueva versión del PCCS, se va a publicar información sobre la intensidad de luz polarizada que emiten estos objetos. Esta información adicional ofrecerá pistas importantes acerca de la estructura física de las radio galaxias y las distintas zonas donde se emite la tre-

menda energía característica de estos objetos.

Los catálogos de fuentes puntuales de *Planck* han sido utilizados para obtener los recuentos numéricos y el comportamiento espectral de las fuentes extragalácticas infrarrojas y de radio. Estos recuentos se utilizan para contrastar los distintos modelos teóricos de formación y evolución de galaxias. De hecho, *Planck* ha demostrado que observando el cielo en la banda de las microondas la mayor parte de las galaxias brillantes que se observan, incluso hasta frecuencias tan altas como 217 GHz, son radio galaxias y no galaxias con fuerte emisión de polvo como se pensaba previamente. También se ha observado un aumento importante en la inclinación de los espectros de los llamados *blazares* (galaxias compactas altamente variables) con índices espectrales en el intervalo entre -0,5 y -1,2. Una posible interpretación es que este comportamiento espectral esté causado, al menos en parte, por una densidad de materia en la región emisora (chorros producidos por los núcleos galácticos activos) menor de lo que se pensaba anteriormente.

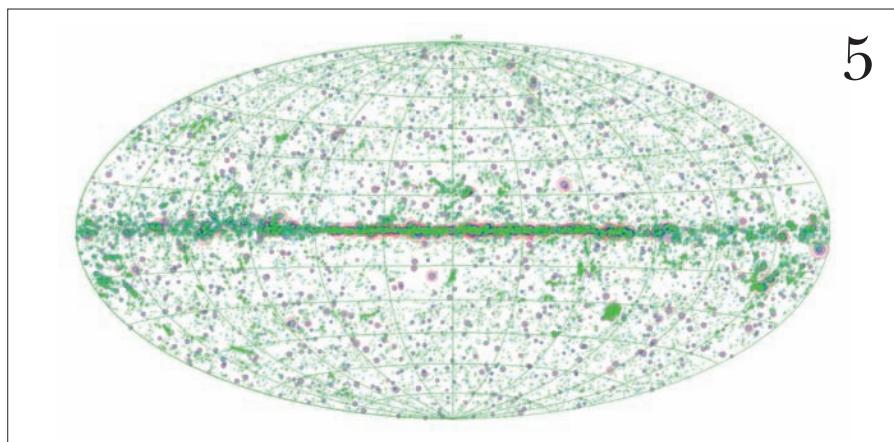


FIGURA 5 Distribución espacial en el cielo de los objetos del PCCS a 30 GHz (rojo), 143 GHz (azul) y 857 GHz (verde). (ESA & Planck Collaboration)

Además, estos catálogos han ofrecido la primera oportunidad de determinar con precisión la función de luminosidad de las galaxias con emisión térmica y las propiedades del polvo en el Universo local (es decir, a distancias menores o iguales a 100 Mpc), en estas longitudes de onda. Gracias a estos descubrimientos, tenemos una mejor idea de cómo son los procesos de formación estelar en el Universo cercano.

Planck también es sensible a otro tipo de radiación de fondo que alcanza el máximo en longitudes de onda más cortas que el FCM, el Fondo Cósmico Infrarrojo (CIB por sus siglas en inglés). En contraste con el FCM, el CIB es una emisión integrada con las aportaciones de todas las galaxias con fuerte formación estelar a través de la historia cósmica: multitud de galaxias demasiado débiles como para ser vistas individualmente, pero cuya luz combinada nos llega en todas las direcciones como un halo de luz difusa. Las observaciones de las fluctuaciones en el CIB realizadas con *Planck* en diferentes longitudes de onda se han utilizado para trazar la distribución a gran escala de las galaxias y su formación estelar en diferentes épocas de la historia cósmica. Estas precisas mediciones indican la potencia de la utilización de las anisotropías del CIB para entender el proceso de formación de galaxias, aunque plantean nuevos retos que esperamos resolver con una nueva generación de experimentos de aún mayor sensibilidad y resolución angular.

NUESTRA GALAXIA, VISTA POR *PLANCK*

El medio interestelar que permea la Vía Láctea brilla fuertemente en todas las frecuencias observadas por *Planck*, debido a una variedad de procesos físicos: desde la emisión térmica de los granos de polvo interestelar a la radiación sincrotrón de los electrones acelerados en los campos magnéticos de remanentes de supernova y otras regiones altamente energéticas. Las imágenes de *Planck* ha sido tratadas cuidadosamente con el fin de aislar cada uno de estos procesos físicos, obteniéndose como subproducto imágenes tan espectaculares como la de la Figura 6, que muestran mapas detallados de la distribución de polvo, gas caliente y plasma a lo largo y ancho de nuestra Galaxia. Pero no solamente se han cartografiado emisores ya conocidos, sino que ha sido posible incluso identificar y caracterizar nuevos procesos físicos que contribuyen a la emisión galáctica. En particular, *Planck* ha confirmado la detección, sugerida por primera vez pocos años atrás, de una misteriosa componente anómala con un máximo de emisión en torno a los 20 GHz. Los datos de *Planck* apoyan la teoría de que dicha emisión anómala puede deberse al espectro de los granos de polvo en rotación rápida del medio interestelar. Por otra parte, *Planck* ha realizado el descubrimiento inesperado de un fulgor neblinoso que envuelve el centro galáctico en las frecuencias de 30 y 44 GHz. Este posee un espectro de sincrotrón «duro», dis-

tinto del resto de zonas galácticas, y su naturaleza es aún desconocida. Algunas de las teorías que se han propuesto para explicar la existencia de esta nueva componente incluyen una densidad de supernovas mayor de lo habitual en las regiones del centro galáctico, la presencia de fuertes «vientos galácticos» emanando del interior de nuestra Galaxia e incluso aniquilaciones de partículas exóticas de materia oscura. La cuestión está lejos de quedar resuelta.

Por último, como parte del PCCS *Planck* ha producido un mapa de las regiones más densas y frías del medio interestelar, aquellas en las que se formará la nueva generación de estrellas, y mapas detallados de nubes moleculares a través de la emisión del monóxido de carbono interestelar, una de cuyas principales transiciones moleculares solapa muy bien con el canal de 100 GHz de *Planck*.

COSMOLOGÍA EN LA ERA DE *PLANCK*

Pero los resultados de ciencia galáctica y extragaláctica no son más que los entremeses del menú que nos ofrece *Planck*. El plato fuerte, aquel para el que fue diseñado el satélite, es sin duda el conjunto de publicaciones de *Planck* que presentan análisis de las pequeñas fluctuaciones de temperatura del FCM, a partir del cual ha sido posible mejorar de forma significativa nuestro conocimiento del modelo cosmológico.

La temperatura de la radiación del FCM no es completamente uniforme. Dependiendo de la dirección en la que observemos, se ven zonas ligeramente más calientes o frías. Estas pequeñas diferencias de temperatura (fluctuaciones) con respecto a la temperatura media del FCM (2,723 K, esto es, -270,425° C), se suelen representar visualmente en las imágenes del FCM como manchas rojizas (más calientes) o azuladas (más frías). Un ejemplo de qué aspecto tienen este tipo de imágenes se puede apreciar en la Figura 7, que presenta una proyección sobre el plano del FCM obtenido por *Planck*. Las fluctuaciones del FCM posiblemente han sido, des-

de su descubrimiento al comienzo de la década de los 90 del siglo pasado, el observable que más ha ayudado a comprender el origen y evolución del Universo, y a establecer, por tanto, el modelo cosmológico que lo define. Las propiedades estadísticas de estas pequeñas fluctuaciones (de una parte en cien mil) vienen determinadas por los parámetros cosmológicos que definen tanto el origen de la rica estructura que observamos en el Cosmos, como su evolución, así como su contenido material y energético.

Casi por completo toda la información que se precisa para determinar dichos parámetros cosmológicos está codificada en la función de correlación a dos puntos, o, equivalentemente, en el espectro angular de potencias de las fluctuaciones del FCM. Dicho de otro modo, es suficiente conocer cómo se correlacionan las manchas de un mapa de las fluctuaciones del FCM, en función de la distancia que las separa, para poder comprender el origen y evolución del Universo: ¡ni más ni menos!

Planck ha venido a corroborar que el Universo observable está bien descrito por el llamado modelo cosmológico estándar (y que viene perfilándose desde la década de los 80): un Universo espacialmente plano y en expansión, con una dinámica gobernada por la Relatividad General; que en su estado primigenio pasó por una fase de aceleración exponencial llamada *inflación cósmica*, dando lugar a unas fluctuaciones iniciales de la densidad de energía, responsables de la estructura del Universo actual; las fluctuaciones atienden a una estadística gaussiana, presentan un espectro de potencias casi invariante de escala y son adiabáticas; casi toda la materia contenida en él (en una razón 5 a 1) está en una forma diferente a la de la materia ordinaria, que interactúa muy débilmente (más allá de a través de la interacción gravitatoria) y no relativista, a la que se la conoce como *materia oscura fría*; finalmente, el Universo parece sufrir actualmente una expansión acelerada causada por una *energía oscura* que, aparentemente, tiene una

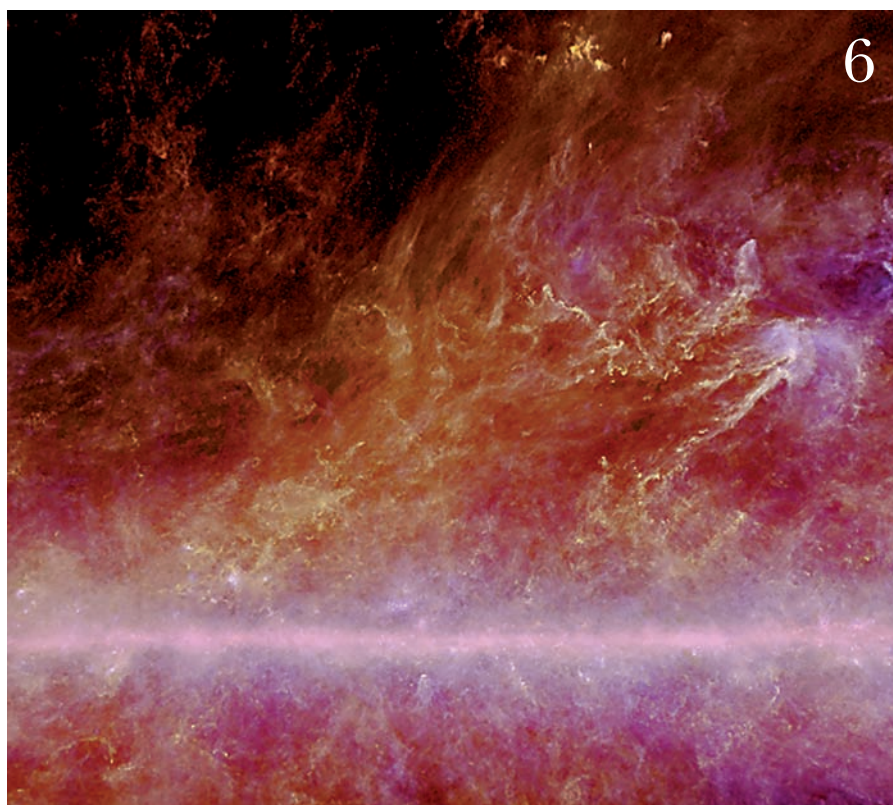


FIGURA 6 Imagen en falso color de las nubes de polvo en una región de 55 grados en torno al plano galáctico. (ESA & Planck Collaboration)

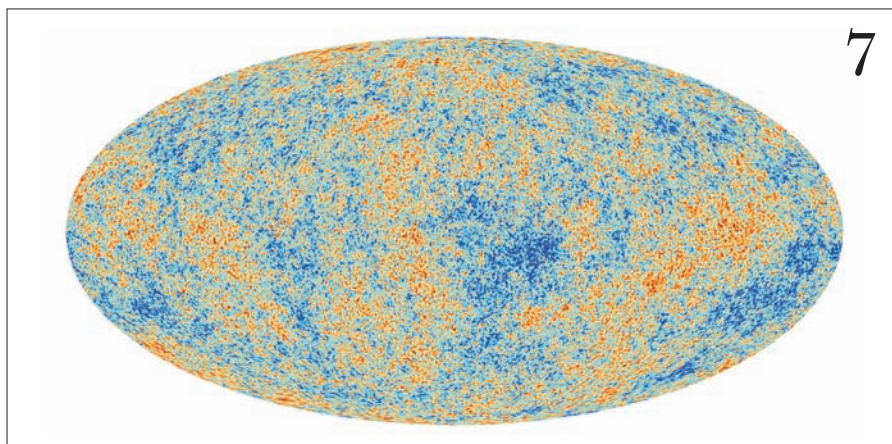
dinámica compatible con una energía de vacío.

Con respecto a la descripción del modelo cosmológico anterior a los datos de *Planck*, la misión de la ESA ha proporcionado valores ligeramente más bajos de la energía oscura (un 6 %) y más altos tanto de la materia ordinaria (un 9 %) como de la oscura (un 18 %, ver Figura 8). Así mismo, el ratio de expansión del Universo (dado en términos de la constante de Hubble) es también ligeramente más bajo que lo proporcionado por otros observables (como las supernovas).

Si bien toda la capacidad total de *Planck* para constreñir el modelo cosmológico solo se manifestará con el análisis de la polarización del FCM que veremos en los próximos meses, ya solo el análisis de la intensidad de esta radiación, que es lo que se ha publicado en 2013, ha proporcionado mejoras y avances muy significativos. Así, *Planck* ha demostrado que, como predice el mecanismo de la inflación cósmica, las fluctuaciones iniciales no son invariantes de escala. Este gran avance se debe, en parte, a la capacidad de *Planck* para detec-

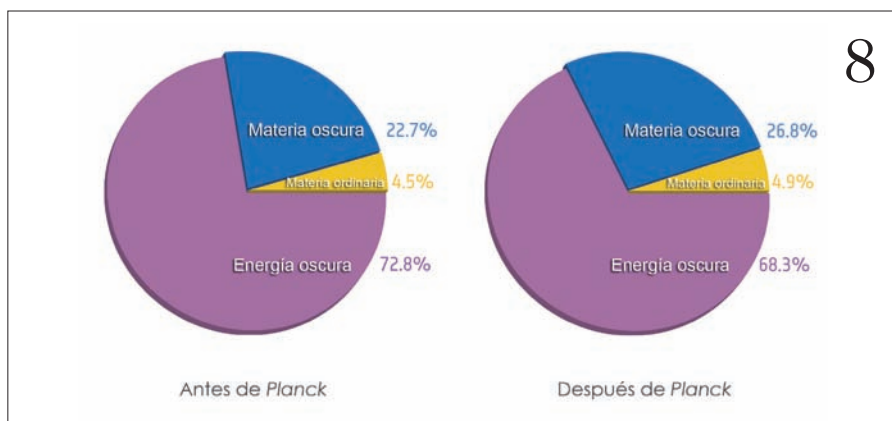
tar el efecto lente gravitatoria que sufren los fotones de la radiación del FCM, al atravesar el campo gravitatorio formado por la red de la estructura a gran escala del Universo. Este efecto se traduce en un suavizado de las fluctuaciones del FCM a las escalas más pequeñas, y ayuda, entre otras cosas, a comprender la física de la reionización del Universo, así como a determinar la amplitud de las fluctuaciones iniciales de energía que, de otra forma, estarían muy degeneradas. *Planck* puede romper esa degeneración sin necesidad de recurrir a la polarización del FCM (especialmente sensible a la reionización del Universo), gracias, precisamente, al efecto lente. Además, el efecto lente confirma el esquema jerárquico de formación de estructura, a partir de las semillas emergidas de la inflación cósmica.

Los datos de *Planck*, junto con los de la polarización del satélite WMAP y la información a más pequeña escala dada por experimentos en tierra como SPT y ACT, no muestran ninguna clara evidencia de extensiones al modelo estándar: no hay indicios de más partículas relativistas,



7

FIGURA 7 Mapa reconstruido por *Planck* de las fluctuaciones de temperatura del FCM. (ESA & Planck Collaboration) **FIGURA 8** El «pastel cósmico», indicando el porcentaje de los distintos componentes del Universo. (ESA & Planck Collaboration)



8

más allá de los neutrinos y el fotón; se descarta el que el Universo sea netamente cerrado o abierto espacialmente; no hay evidencia de fluctuaciones de isocurvatura (fluctuaciones en las que la densidad total de energía permanece constante); y se ha reducido aún más el papel que los defectos topológicos hayan podido tener en la formación de estructura. Además, los límites impuestos a las ondas gravitatorias primigenias alcanzan el límite teórico de lo que cabría esperar al disponer solo de información de la intensidad de la radiación del FCM. Habrá que esperar al análisis de la polarización para ver hasta dónde es capaz de llegar *Planck* en lo que, se cree, será una de las pruebas más decisivas de la validez del modelo inflacionario.

Por último, hay que resaltar que el espectro angular de potencias de *Planck* presenta una cierta tensión entre los valores que se corresponden a las escalas angulares más grandes (más de 5 grados) y los de las escalas más pequeñas (por debajo de 20 minutos de arco): las primeras muestran un déficit de potencia con lo que marcan las segundas. El ori-

gen de esta anomalía «a gran escala» aún no está claro, pero podría estar relacionada con otras anomalías que *Planck* ha mostrado, en particular, al analizar el mapa de la radiación del FCM en su conjunto y que tienen que ver con violaciones de la isotropía. Estas últimas ya fueron encontradas en los datos del satélite WMAP con una significación estadística similar. Al detectarlas también en los datos de *Planck*, se ha confirmado que no son debidas a un defecto de medida del satélite, sino que son intrínsecas a la radiación primigenia. Las anomalías están relacionadas con la distribución espacial de las fluctuaciones del FCM. Podemos destacar varias desviaciones con significación cercana al 1 %. En primer lugar las diferencias entre las fluctuaciones positivas y negativas de la RFCM son menores de lo esperado, cuando se miran a gran escala; además, existe una asimetría entre las propiedades estadísticas del hemisferio norte y el sur y por último destacamos también la existencia de una mancha en el hemisferio sur de la bóveda celeste cuyo tamaño y temperatura (extremadamente fría) son

excepcionales. Esta llamada Mancha Fría fue descubierta por primera vez en 2004 por científicos del IFCA en los datos del WMAP y se ha sugerido una posible explicación basada en un tipo de defecto cósmico (una textura cósmica) asociado a transiciones de fase con rotura de simetría en el Universo primitivo. La significación estadística de estas anomalías no es suficiente como para descartar el modelo estándar, pero sí para que la comunidad científica se haya centrado en buscar una posible explicación. Los datos de polarización de *Planck*, que serán analizados este año, podrían ser la clave para desvelar el misterio.

LA CONTRIBUCIÓN ESPAÑOLA A PLANCK

La comunidad española del FCM ha tenido un papel relevante en la misión *Planck*. Su contribución, liderada por los grupos del Instituto de Física de Cantabria (IFCA) y del Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC), ha sido tanto a nivel instrumental como de explotación científica de los datos. El IFCA coordinó las actividades realizadas en colaboración con el Departamento de Ingeniería de las Comunicaciones (Universidad de Cantabria) y el Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones (Universidad Politécnica de Cataluña), para el diseño, desarrollo y fabricación de los módulos posteriores de los radiómetros a 30 y 44 GHz del LFI. El IAC fue el responsable del desarrollo de la electrónica de control de tanto la adquisición, como la compresión y la transmisión de datos del LFI. También ha existido una contribución al HFI consistente en la electrónica del regulador del sistema de enfriamiento a 4 K y que fue responsabilidad del Departamento de Física Teórica

y del Cosmos (Universidad de Granada). Todos estos equipos tuvieron que pasar unas duras pruebas de calificación espacial, realizadas en diferentes compañías españolas de la industria espacial, antes de ser integrados con el resto de los instrumentos. Además de cumplir las especificaciones requeridas, mostraron un buen funcionamiento durante todo el periodo que duró la misión.

La contribución española a la explotación científica de los datos también ha sido notable tanto en relación a astrofísica galáctica y extragaláctica no relacionada con el FCM (PCCS y catálogo de cúmulos de galaxias) como a la cosmología que se deriva del análisis de dicho fondo (*Planck Core Science Program*). En relación con lo segundo, investigadores del IFCA han liderado varias publicaciones cosmológicas basadas en el primer análisis de los datos del FCM provistos por *Planck* y que fueron publicados en marzo de 2013. Estas publicaciones versaron sobre las propiedades de la isotropía y la estadística del FCM, la detección del corrimiento al rojo gravitatorio producido por la estructura a gran escala del Universo en épocas recientes de su historia, y el ya mencionado catálogo PCCS. También han tenido una contribución importante en la elaboración de algunos productos de la misión, a través del desarrollo de algoritmos de detección de fuentes puntuales (IFCAMEX) y del método de separación de componentes SEVEM, que como hemos apuntado produjo uno de los cuatro mapas oficiales de la misión. Por otro lado, investigadores del IAC coordinaron la ciencia relacionada con el catálogo de cúmulos de galaxias producido por *Planck*.

El importante papel desempeñado por la comunidad española del FCM en relación a la explotación científica de los datos hechos públicos y que fueron tomados durante el tiempo nominal previsto inicialmente para la misión, se sigue manteniendo actualmente en la explotación científica de los datos finales de la misión que se harán públicos a final de 2014. Los datos finales constituirán

un volumen el doble que los ya publicados e incluirán, además de la intensidad, la polarización del FCM. Ello permitirá una mejora sustancial en la precisión con que podremos determinar los parámetros cosmológicos así como un test independiente del modelo estándar del Universo.

EN CONCLUSIÓN

Gracias a *Planck* hemos podido confirmar que vivimos en un Universo espacialmente plano, que se expande aceleradamente debido a la existencia de una misteriosa energía oscura, y en el que las estructuras hoy visibles (estrellas, galaxias, cúmulos de galaxias) se han formado por agregación gravitatoria a partir de unas diminutas fluctuaciones primordiales de densidad de materia y energía, en las que la parte dominante corresponde a otra componente bastante enigmática que llamamos materia oscura. Todo esto ya se intuía antes de la llegada de las imágenes de *Planck*, pero ahora disponemos de datos mucho más precisos para contrastar nuestras teorías y para afianzar el Modelo Estándar de la Cosmología. Podría decirse que *Planck* ha servido para corroborar y mejorar teorías ya existentes, pero su impacto va más allá: lejos de cerrar el debate, los primeros resultados cosmológicos de *Planck* han apuntado la existencia de nuevos y sorprendentes enigmas, como el de las anomalías en el mapa de la radiación del FCM o en el espectro angular de potencias de las anisotropías del FCM. En el campo de la astrofísica galáctica y extragaláctica, *Planck* ha permitido la obtención de mapas y catálogos completos de regiones galácticas, radio galaxias, galaxias infrarrojas y cúmulos de galaxias a todo el cielo, encontrando además una nueva componente galáctica previamente desconocida (el «fulgor» sincrotrón en torno al centro de la Vía Láctea) y confirmando y caracterizando en detalle otra cuya presencia no se comprendía del todo bien, la emisión anómala de los granos de polvo interestelar en rotación. Y todo esto no es sino la antesala de lo que se espera encontrar

cuando los datos finales de *Planck*, incluyendo las medidas de polarización del FCM, se terminen de estudiar y se hagan públicos en los próximos meses.

Por último, no hay que olvidar que los datos de *Planck* se harán de dominio público, permitiendo a investigadores de todo el mundo trabajar con ellos y combinarlos con los de otros experimentos pasados, presentes y futuros (WMAP, ACT, SPT, el experimento hispano-británico QUIJOTE, EUCLID, la posible misión europea CORE/PRISM, el proyecto J-PAS, etc.) para conseguir un cuadro más detallado de un Universo que, a día de hoy, sigue siendo extraño y maravilloso. (A)

AGRADECIMIENTOS:

Se puede encontrar una descripción de la Colaboración *Planck* y una lista de sus participantes, incluyendo las actividades científicas y técnicas por ellos desarrolladas, en www.rssd.esa.int/index.php?project=PLANCK&page=Planck_Collaboration. La Colaboración *Planck* agradece el apoyo institucional y financiero de las siguientes entidades y proyectos: ESA; CNES y CNRS/INSU-IN2P3-INP (Francia); ASI, CNR, e INAF (Italia); NASA y DoE (EE. UU.); STFC y UKSA (Reino Unido); CSIC, MICINN y JA (España); Tekes, AoF y CSC (Finlandia); DLR y MPG (Alemania); CSA (Canadá); DTU Space (Dinamarca); SER/SSO (Suiza); RCN (Noruega); SFI (Irlanda); FCT/MCTES (Portugal); y PRACE (Unión Europea).

Los miembros del Grupo de Cosmología Observacional e Instrumentación del Instituto de Física de Cantabria (IFCA) que firman este artículo son el Profesor de Investigación del CSIC **Enrique Martínez**, el Científico Titular del CSIC **José María Diego**, el Profesor Titular de la Universidad de Cantabria (UC) **Diego Herranz**, los Profesores Contratados Doctores de la UC **Belén Barreiro**, **Patricio Vielva** y **Marcos Cruz** y los investigadores postdoctorales **Marcos López-Caniego** y **Joaquín González-Nuevo**.
